

[принята Постановлением Правительства Российской Федерации от 3 октября 2013 г. № 864]. – М., 2013. – 34 с.

2. Анализ пассивной безопасности маломестных автобусов на основании статистики ДТП / А. М. Иванов, А. А. Никитин, Н. С. Харламов, С. Г. Зубрицкий // Журнал автомобильных инженеров. – 2009. – № 2. – С. 27–30.

3. *Вашурин А. С.* Разработка методики и оценка пассивной безопасности кузовов из многослойных панелей вахтовых автобусов : дис. ... канд. техн. наук. 05.05.03. – Н. Новгород, 2014. – 225 с.

4. Определение характеристик многослойных панелей кузова автобуса / Л. Н. Орлов, А. В. Тумасов, А. С. Вашурин [и др.] // Вестник ИжГТУ. – 2012. – № 1. – С. 4–7.

A. S. Vashurin, Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. Y. Alekseev

L. N. Orlov, DSc in Engineering, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. Y. Alekseev

A. V. Tumasov, PhD in Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. Y. Alekseev

Estimation of Influence of Individual Design and Technological Peculiarities on the Passive Safety of Shift Bus Bodies Made of Multilayer Panels

The paper presents the results of investigation of influence of individual design and technological peculiarities on the passive safety of shift bus bodies made of multilayer panels.

Keywords: passive safety, bus, rollover, simulation, sandwich panel.

Получено 03.10.2014

УДК 629.7

А. В. Алиев, доктор физико-математических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

О. А. Воеводина, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

МОДЕЛИ РАСЧЕТА ВНУТРИКАМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕГУЛИРУЕМЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

Для регулируемых двигательных установок выполнен сравнительный анализ параметров внутренней баллистики, устанавливаемый решением термогазодинамических уравнений в постановке замороженного состава продуктов сгорания и в химически равновесной постановке. Показано, что при использовании низкотемпературных твердых топлив нецелесообразно использовать модели, учитывающие химические реакции в камере сгорания двигателя из-за их вычислительной трудоемкости. Модели для химически не взаимодействующих компонентов обеспечивают приемлемую для практики точность как по значениям давления в камере сгорания, так и по значениям температуры.

Ключевые слова: ракетный двигатель, внутренняя баллистика, химически равновесный состав, продукты сгорания, математическая модель, термодинамические характеристики.

Одним из этапов проектирования газогенераторных устройств и ракетных двигателей, работающих на твердом топливе (ГГ, РДТТ), является анализ внутрикамерных процессов. Теория расчета задач внутренней баллистики РДТТ и газогенераторных систем излагается, например, в [1–3], при этом основное допущение, принимаемое при построении математических моделей процессов, состоит в том, что продукты сгорания в камере сгорания полагаются химически не реагирующей механической смесью воздуха, первоначально заполнявшего камеру, продуктов сгорания воспламенительной навески и продуктов сгорания твердого топлива. Тем не менее нельзя исключать из рассмотрения кинетические эффекты [4], обусловленные химическим взаимодействием отдельных компонентов продуктов сгорания, количество которых может быть более ста. Учет кинетических эффектов при решении задач проектирования ГГ и РДТТ не представляется возможным из-за высокой вычислительной трудоемкости. В [5, 6] при ре-

шении термодинамических задач в химических реакторах (к ним можно отнести ГГ и РДТТ) полагается, что в камере сгорания практически мгновенно устанавливается химическое и термодинамическое равновесие. Такое допущение, как и допущение о течении замороженной смеси, не в полной мере соответствует действительности, поскольку скорость отдельных химических реакций может быть относительно невысокой. В связи с этим реальные термодинамические характеристики продуктов сгорания будут принимать значения, размещающиеся в интервале между характеристиками продуктов сгорания, полученных в условиях замороженной смеси и полученных в условиях полного термодинамического равновесия. Два решения как асимптоты устанавливают границы реальных значений параметров, которые могут быть получены с использованием моделей течения химически реагирующих смесей газа, однако потребные вычислительные ресурсы при этом становятся приемлемыми при решении задач проектирования.

Ниже приводится анализ результатов расчетов параметров внутренней баллистики в задаче о работе регулируемого РДТТ [7], конструктивная схема которого представлена на рис. 1. В состав РДТТ входят система воспламенения (на рис. 1 не попадает в рассматриваемое сечение), топливный заряд 2, сопловые блоки 1, 4 и рулевые машины 3.

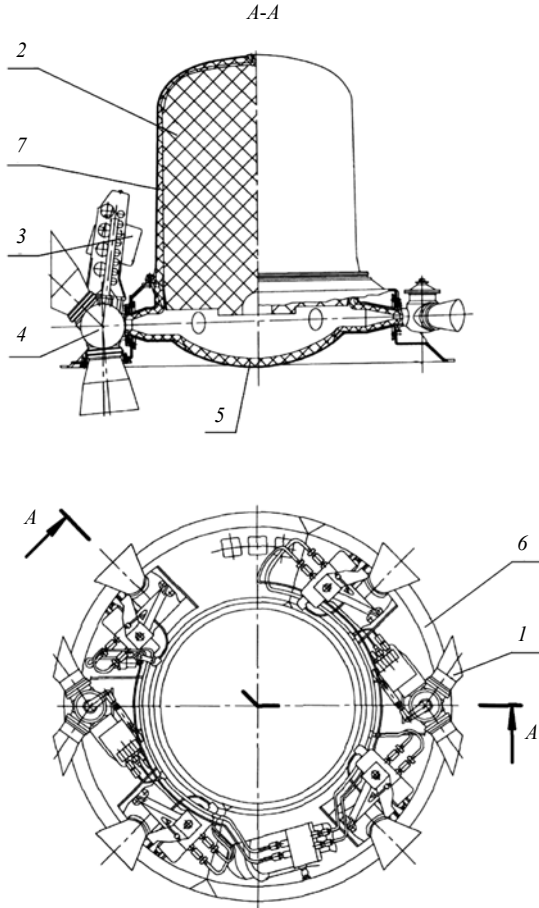


Рис. 1. Конструктивная схема регулируемого двигателя: 1 – сопловой блок крена; 2 – топливный заряд; 3 – рулевая машина; 4 – сопловой блок тангажа и рыскания; 5 – сопловая крышка; 6 – агрегатный отсек; 7 – камера сгорания

Решение задачи внутренней баллистики в постановке с течением химически не реагирующих компонентов (воздух, продукты сгорания воспламенительной навески, продукты горения твердого топлива) осуществляется по математической модели, предполагающей осреднение основных термогазодинамических параметров по внутрикамерному объему [7]. Уравнения имеют вид:

$$\frac{d\rho W}{dt} = G_{\text{вс}} + G_{\text{т}} - G_{\text{с}};$$

$$\frac{d\rho_{\text{в}} \alpha_{\text{в}} W}{dt} = G_{\text{вс}} - \alpha_{\text{в}} G_{\text{с}};$$

$$\frac{d\rho_{\text{т}} \alpha_{\text{т}} W}{dt} = G_{\text{т}} - \alpha_{\text{т}} G_{\text{с}};$$

$$\frac{d\rho W E}{dt} = G_{\text{вс}} H_{\text{в}} + G_{\text{т}} H_{\text{т}} - k G_{\text{с}} E - q_{\text{т}} S_{\text{т}} (1 - \delta_{\text{т}}) - q_{\text{к}} S_{\text{к}};$$

$$\alpha_{\text{в}} + \alpha_{\text{т}} + \alpha_0 = 1;$$

$$p_{\text{к}} = \rho (k - 1) E; \quad T = E / c_{\text{в}}; \quad k = c_{\text{р}} / c_{\text{в}};$$

$$c_{\text{р}} = c_{\text{рв}} \alpha_{\text{в}} + c_{\text{рт}} \alpha_{\text{т}} + c_{\text{р0}} \alpha_0; \quad (1)$$

$$c_{\text{в}} = c_{\text{вв}} \alpha_{\text{в}} + c_{\text{вт}} \alpha_{\text{т}} + c_{\text{в0}} \alpha_0;$$

$$G_{\text{с}} = A_{\text{с}} p_{\text{к}} F_{\text{мин}}; \quad G_{\text{т}} = \rho_{\text{т}} u_{\text{т}} S_{\text{т}} \delta_{\text{т}};$$

$$\delta_{\text{т}} = \begin{cases} 0, & \text{топливо не горит,} \\ 1, & \text{топливо горит.} \end{cases}$$

Коэффициент истечения $A_{\text{с}}$, входящий в уравнения (1) определяется по формулам:

$$A_{\text{с}} = \sqrt{\frac{k}{\varphi_{\text{к}} R T} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{2(k-1)}} \quad \text{при} \quad \frac{p_0}{p_{\text{к}}} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}};$$

$$A_{\text{с}} = \sqrt{\frac{2k}{\varphi_{\text{к}} (k-1) R T} \left(\left(\frac{p_0}{p_{\text{к}}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_0}{p_{\text{к}}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)} \quad \text{при}$$

$$\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} < \frac{p_0}{p_{\text{к}}} < 1; \quad (2)$$

$$A_{\text{с}} = 0 \quad \text{при} \quad \frac{p_0}{p_{\text{к}}} > 1.$$

Здесь и ниже приняты обозначения: t – текущее время; $\rho, E, T, p_{\text{к}}, p_0$ – плотность, внутренняя энергия, температура и давление продуктов сгорания, давление окружающей среды; $\alpha_0, \alpha_{\text{в}}, \alpha_{\text{т}}$ – массовые концентрации воздуха, продуктов горения воспламенительной навески и топлива в общем объеме продуктов сгорания; $G_{\text{вс}}, G_{\text{т}}, G_{\text{с}}$ – секундные массовые приходы от воспламенителя, топлива и секундный массовый расход из камеры сгорания двигателя; $H_{\text{в}}, H_{\text{т}}$ – полное теплосодержание продуктов горения воспламенительной навески и твердого топлива; $c_{\text{р}}, c_{\text{в}}, R$ – удельные теплоемкости и газовая постоянная; $u_{\text{т}}, \varphi_{\text{к}}$ – скорость горения топлива и коэффициент внутрикамерных потерь; $W, F_{\text{мин}}, S_{\text{т}}$ – объем камеры, площадь минимального сечения и площадь поверхности горения топлива.

Суммарная площадь минимального сечения сопловых блоков $F_{\text{мин}}$ является функцией времени и запрограммированного уровня рабочего давления в камере сгорания. В математической модели значение площади минимального сечения определяется как функция угла поворота φ вала рулевой машины. Уравнение для угла φ имеет вид [7]

$$k_1 k_2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + (k_1 + k_2) \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = K \delta_{\text{с}}(t). \quad (3)$$

В записанной формуле, определяющей закон регулирования РДТТ, значения коэффициентов

K, k_1, k_2 и $\delta_c(t)$ устанавливаются из экспериментов и из теоретических посылок.

Расчет процессов в РДТТ в постановке течения химически равновесного состава продуктов сгорания предполагает учет всех компонентов смеси (их 24 для решаемой задачи). Решение задачи осуществляется по уравнениям (1), но дополнительно осуществляется расчет состава продуктов сгорания, соответствующих этому составу теплофизических характеристик смеси и температуры продуктов сгорания. Методика расчета параметров для равновесного состава продуктов сгорания содержится, например, в [5]. В отличие от методики [5] для увеличения надежности вычислительного процесса в алгоритмах решения систем линейных уравнений вместо метода Гаусса используется QR-метод [8, 9].

При проведении расчетов внутренней баллистики регулируемого двигателя полагалось, что в качестве воспламенительного состава используется трубчатая шашка с бронированными торцами, выполненная из пороха КЗДП (условная формула пороха $N_{6,493}O_{22,768}C_{11,362}N_{7,319}S_{3,243}K_{7,319}$), а твердое топливо смесевое безметальное (условная формула $C_{16,7}H_{40,8}O_{25,1}N_{17,8}Cl_{3,0}$).

Расчеты показывают, что влияние выбранной модели внутриваллиастических процессов можно отметить даже при анализе автономной работы системы воспламенения (полагается, что при автономной работе продукты сгорания из корпуса воспламенителя истекают в окружающее пространство). На рис. 2 приводятся зависимости от времени давления $p(t)$ продуктов горения воспламенительной шашки в корпусе для одного из вариантов конструкции СВ. Анализ показывает, что уровни давления, полученные по моделям равновесного (кривая 1) и замороженного (кривая 2) течения в рассматриваемом случае могут отличаться более чем на 10 %. Отличие температуры продуктов сгорания также может достигать 10 %. Как следствие, отличаются секундные массовые расходы продуктов сгорания из корпуса СВ, время их работы.

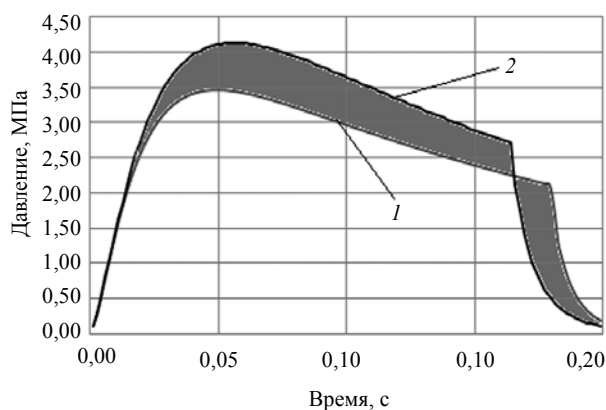


Рис. 2. Зависимость давления в корпусе воспламенителя от времени: 1 – равновесное течение; 2 – механическая смесь

Выполненные расчеты, связанные с работой СВ в составе регулируемого РДТТ, показывают, что на этапе выхода двигателя на режим заметных отличий кривых $p(t)$ для давления в камере сгорания двигателя, полученных при использовании обеих моделей, не наблюдается (рис. 3). Отличие уровней давления наблюдается только после выхода РДТТ на основной программный уровень ($p_{пр} = 4,0$ МПа).

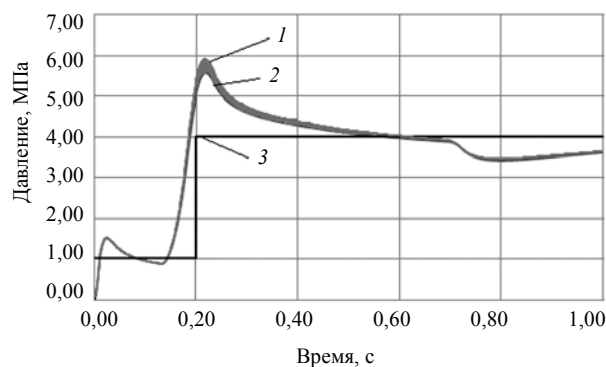


Рис. 3. Зависимость давления в камере РДТТ (этап выхода на режим): 1 – равновесное течение; 2 – механическая смесь; 3 – программное давление

На рис. 4 и 5 представлены зависимости давления и температуры от времени для регулируемого РДТТ, работающего в течение 30 с на двух основных режимах работы – $p_{пр} = 4,0$ МПа и $p_{пр} = 7,0$ МПа. Анализ кривых давления (рис. 4) показывает, что система регулирования обеспечивает значения давления в камере сгорания на программном уровне (кривая 3). Заметное отличие давлений (до 5 % и более) наблюдается лишь на переходных режимах на заключительном этапе работы РДТТ. В то же время отличие значений температуры, получаемое при решении задачи внутренней баллистики по моделям не реагирующей и химически равновесной смеси, практически значимо (рис. 5). Анализ показывает, что отличие температур в сравниваемых расчетах может достигать 10 %.

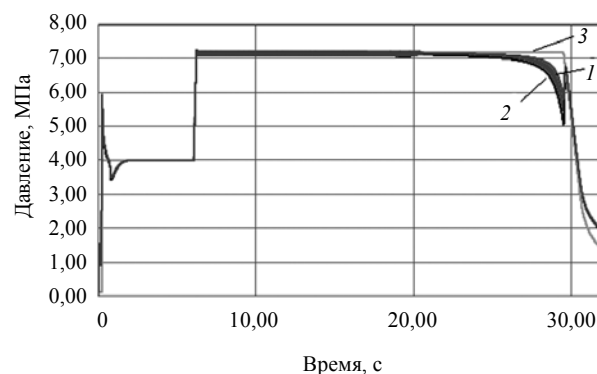


Рис. 4. Зависимость давления в камере РДТТ (основной этап работы): 1 – равновесное течение; 2 – механическая смесь; 3 – программное давление

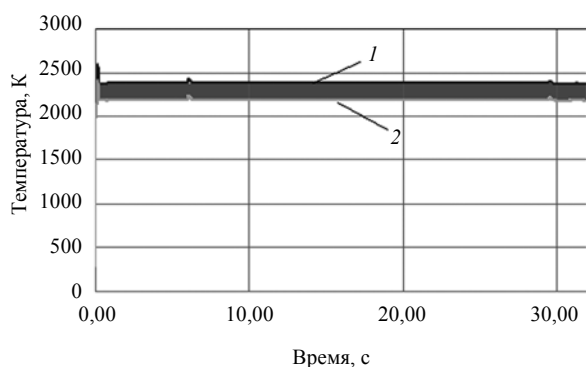


Рис. 5. Зависимость температуры продуктов сгорания в камере РДТТ (основной этап работы): 1 – равновесное течение; 2 – механическая смесь

По результатам выполненного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Применяемые в настоящее время математические модели работы РДТТ основаны на предположениях о том, что в камере сгорания не происходит химических реакций между отдельными компонентами смеси. Применение таких моделей позволяет использовать в расчетах внутренней баллистики вычислительную технику средней производительности. Применение моделей течения химически реагирующей смеси продуктов сгорания требует применения высокопроизводительной вычислительной техники, в том числе суперкомпьютеров.

2. Анализ показал, что при расчетах задач внутренней баллистики для регулируемых РДТТ с низкотемпературными топливами отличий в результатах, полученных при использовании моделей химически не реагирующих продуктов сгорания и моделей химически равновесного состава, практически не наблюдается. Этот факт позволяет на этапе проектирования РДТТ применять относительно нетребователь-

ные по ресурсам ЭВМ математические модели течения не реагирующей смеси продуктов сгорания.

3. Если в практических задачах имеется необходимость в определении химического состава продуктов сгорания (например, задачи экологии, связанные с утилизацией РДТТ), то модели не реагирующей смеси продуктов сгорания становятся неприемлемыми.

Библиографические ссылки

1. Соркин Р. Е. Газотермодинамика РДТТ. – М. : Наука, 1967. – 368 с.
2. Ерохин Б. Т., Липанов А. М. Квазистационарные и нестационарные режимы работы РДТТ. – М. : Машиностроение, 1977. – 200 с.
3. Численный эксперимент в теории РДТТ // А. М. Липанов, В. П. Бобрышев, А. В. Алиев [и др.]. – Екатеринбург : Наука, 1994. – 302 с.
4. Полак Л. С., Гольденберг М. Я., Левицкий А. А. Вычислительные методы в химической кинетике. – М. : Наука, 1984. – 280 с.
5. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания : справочник : в 10 т. / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, А. П. Тишин, В. А. Худяков ; под ред. В. П. Глушко. – М. : ВИНТИ, 1971. – Т. 1–10.
6. Математическое моделирование высокотемпературных процессов в энергосиловых установках / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, В. Г. Крюков, В. И. Наумов. – М. : Наука, 1989. – 285 с.
7. Твердотопливные регулируемые двигательные установки / РАРАН; Ю. С. Соломонов, А. М. Липанов, А. В. Алиев, А. А. Дорофеев, В. И. Черепов – М. : Машиностроение, 2011. – 416 с.
8. Алиев А. В., Мищенко О. В. Математическое моделирование в технике. – Ижевск : Ин-т компьютерных исследований, 2012. – 456 с.
9. Мищенко О. В., Воеводина О. А. Применение LU- и QR-методов при решении задачи о равновесном составе продуктов химической реакции // Вестник ИжГТУ. – 2014. – № 3(63). – С. 172–176.

A. V. Aliev, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

O. A. Voevodina, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Models of Calculating the Intrachamber Processes in Controlled Propulsion System

For controlled propulsion systems a comparative analysis is carried out for parameters of internal ballistics. The analysis is established by solving the thermodynamic equations for the frozen state of products of combustion and for the chemically equilibrium statement. It is shown that when using the low-temperature solid fuels it is impractical to apply a model which takes into account chemical reactions in the combustion chamber of engines due to their computational complexity. The models for chemically non-interacting components provide the accuracy practically acceptable according to both the pressure in the combustion chamber and temperature values.

Keywords: rocket engine, internal ballistics, chemical equilibrium composition, products of combustion, mathematical model, thermodynamic characteristics.

Получено 21.10.2014